



Lärminderung durch Innovationen im Flugzeugbau

Ulf Michel

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Antriebstechnik, Abteilung Triebwerksakustik, Berlin

Das DLR

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Raumfahrt-Agentur der Bundesrepublik Deutschland



DLR: Standorte und Mitarbeiter

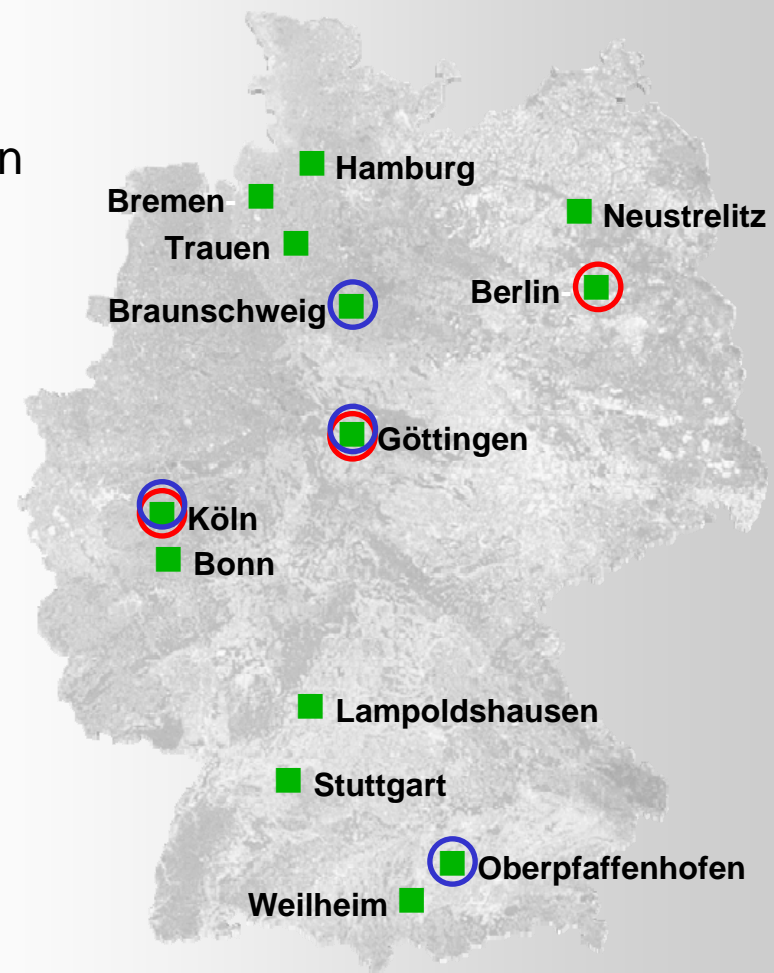
6500 Mitarbeiter arbeiten in
29 Forschungsinstituten und Einrichtungen in

■ 13 Standorten.

Büros in Brüssel,
Paris und Washington.

○ Standorte des Instituts für
Antriebstechnik und seiner Außenstellen

○ Weitere Standorte mit
Forschungsarbeiten zum Fluglärm

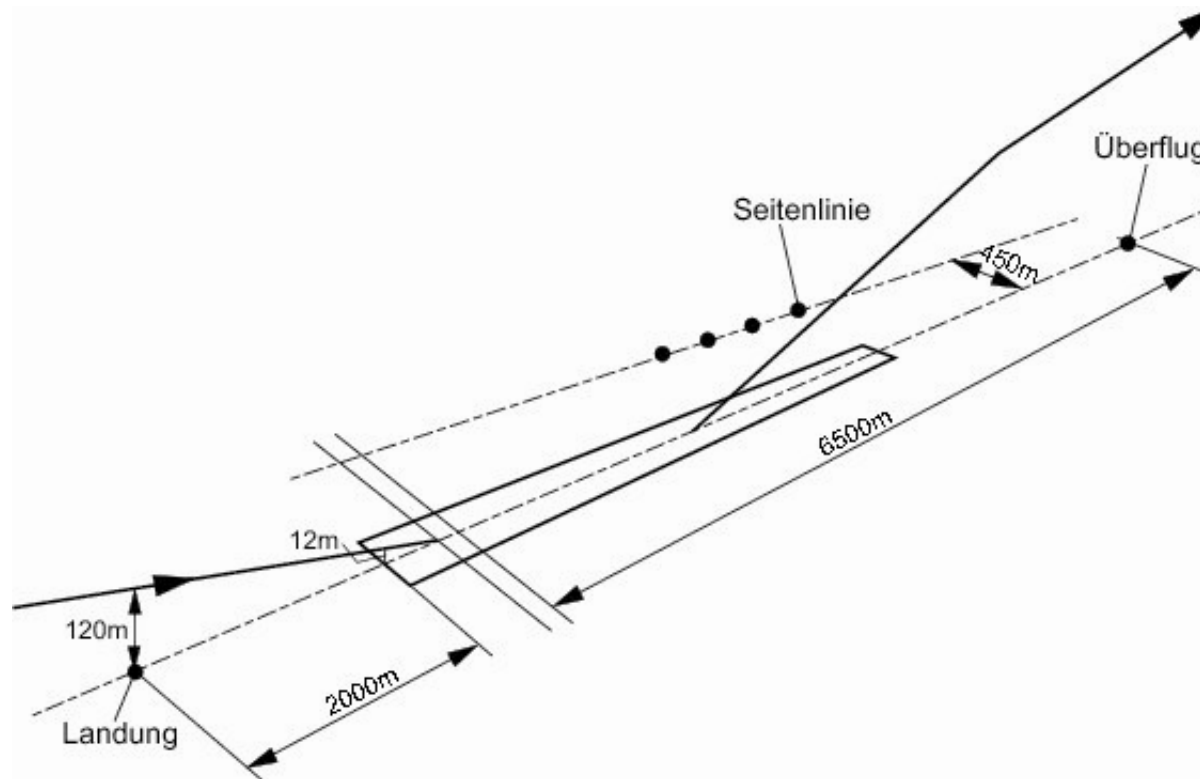


DLR Standorte mit Fluglärmforschung

- Berlin, Köln Triebwerkslärm
- Braunschweig Umströmungslärm, Flugverfahren
- Göttingen Umströmungslärm, Kabinenlärm, Lärmimmission
- Oberpfaffenhofen Schallausbreitung in der Atmosphäre

Beurteilung der Erfolge bei der Lärminderung von Flugzeugen an Hand der Zertifizierungspegel

Lärmzulassung nach ICAO, Annex 16

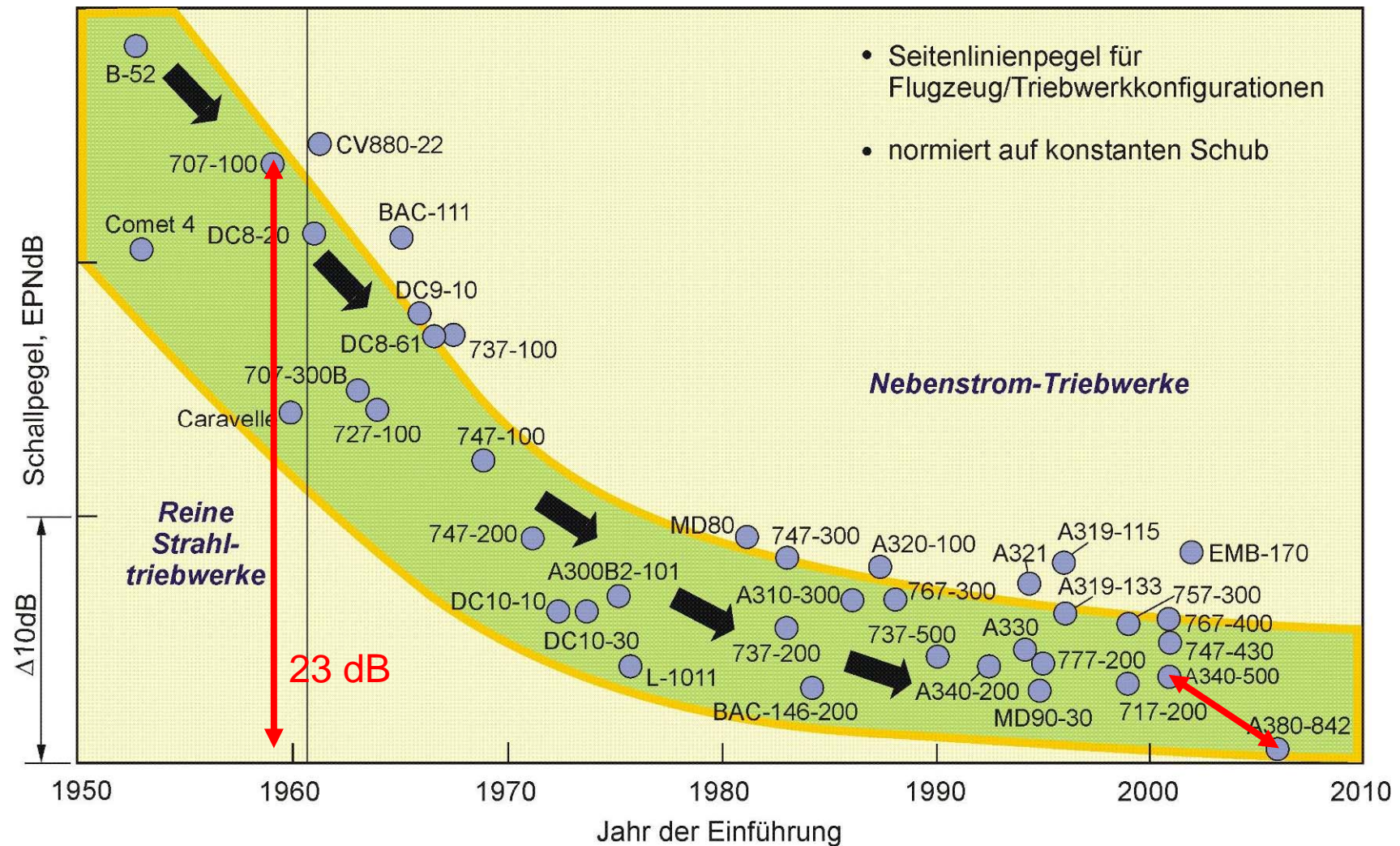


Start-Seitenlinie
Start-Überflug
Landeanflug

**450 m neben Startbahn
6,5 km hinter Rollbeginn
2 km vor Landeschwelle**

Triebwerk
Triebwerk und Steigfähigkeit
Triebwerk und Umströmung

Erfolge bei der Lärminderung dargestellt mit normiertem Seitenlinienpegel



ICAO Messpunkt Seitenlinie normiert auf konstanten Schub

- 23 dB Lärminderung in 50 Jahren.
- Minderung der normierten Schalleistung um den Faktor 200 auf nur noch 0.5% der Schalleistung einer Boeing 707-100.
- Keine wesentliche Minderung des Seitenlinien-Schallpegels seit 1985.
Grund: ICAO Lärmgrenzen werden eingehalten, leisere Flugzeuge wären im Betrieb teurer.
- Dennoch gibt es Fortschritte. Im Vergleich zwischen A340-500 mit A380-800 ist letzterer 4 dB leiser. 2 dB davon sind das Verdienst einer Fluggesellschaft, die das zur Vermeidung von Nachtflugbeschränkungen in London gefordert hat.
- Triebwerke der A380 strahlen praktisch keine Töne mehr ab.
- Dies wird hoffentlich auch bei weiteren neuen Flugzeugen mit Turbofan-Antrieb so sein:
Boeing 787, Boeing 747-8, Bombardier C-Series, Airbus A350

Überblick über Schallquellen im Triebwerk



Schallquellen in Triebwerken

Fan

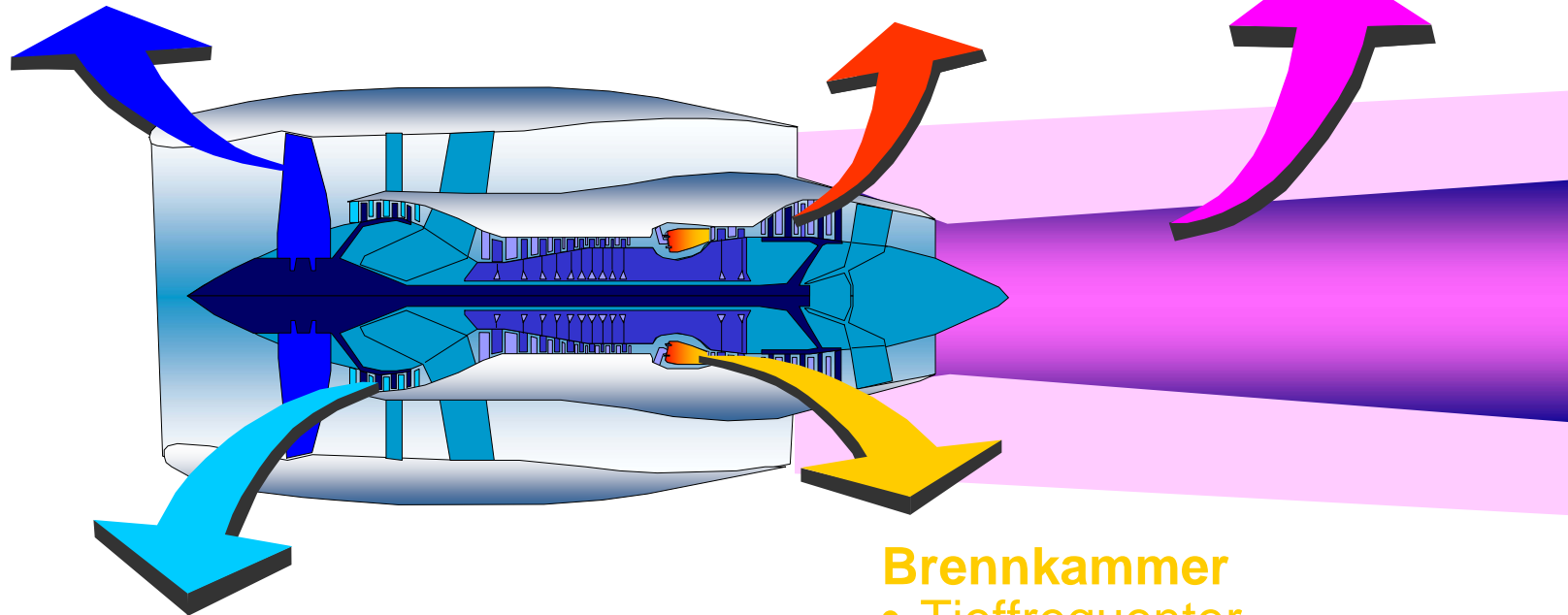
- Töne bei verschiedenen Frequenzen
- Breitbandlärm
- „Buzz saw“-Lärm

Turbine

- Hochfrequente Töne
- Hochfrequenter Breitbandlärm

Strahl

- Tieffrequenter Breitbandlärm



Verdichter

- Hochfrequente Töne
- Breitbandlärm

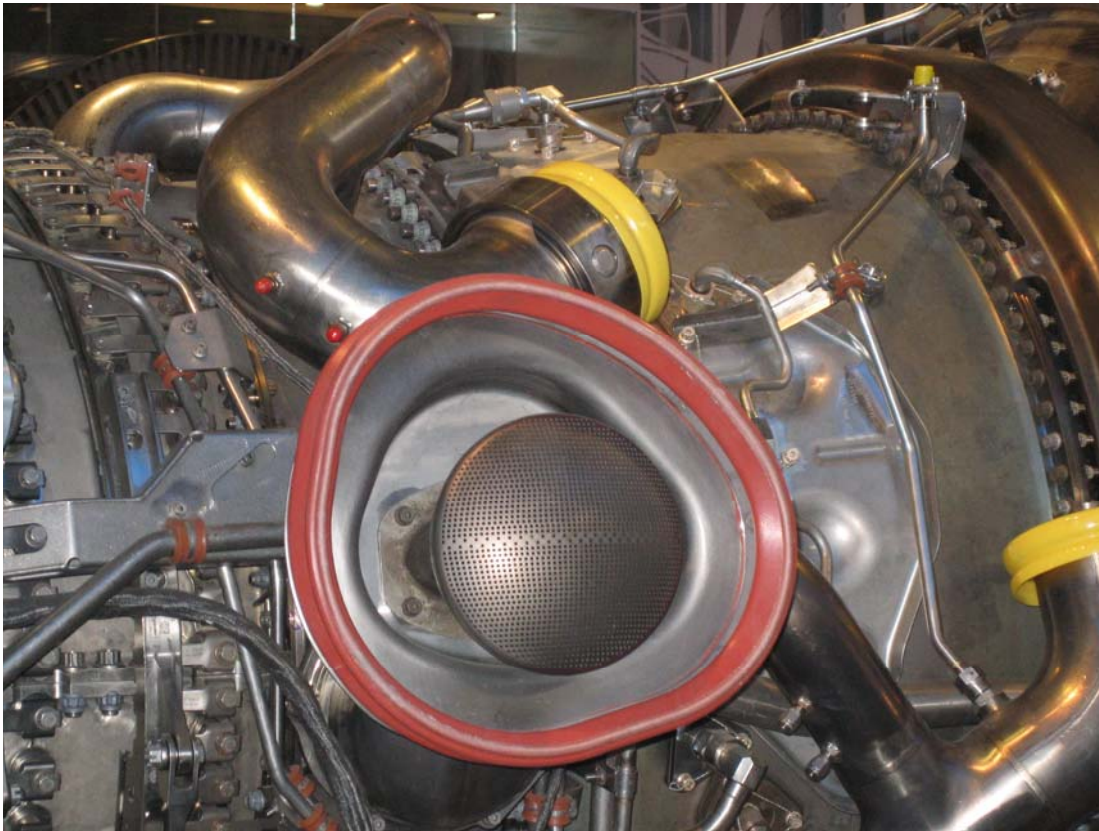
Brennkammer

- Tieffrequenter Breitbandlärm



Weitere wichtig gewordene Schallquellen: Abblaseventile (Bleed valves)

- Bleed Valves sind für den Betrieb bei Teillast (Landung) erforderlich

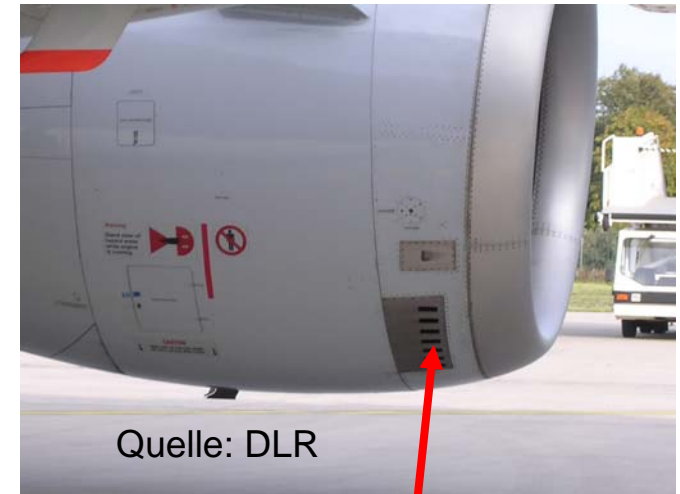


Quelle: Michel

- Druck im Kerntriebwerk
wie bei modernen
Turbofans immer größer
- Ein Teil des
Massenstroms muss bei
Teillast abgelassen
werden.
- Überdruck wird in
Hunderten von kleinen
Freistrahlen abgebaut
- Geräuscentwicklung
groß

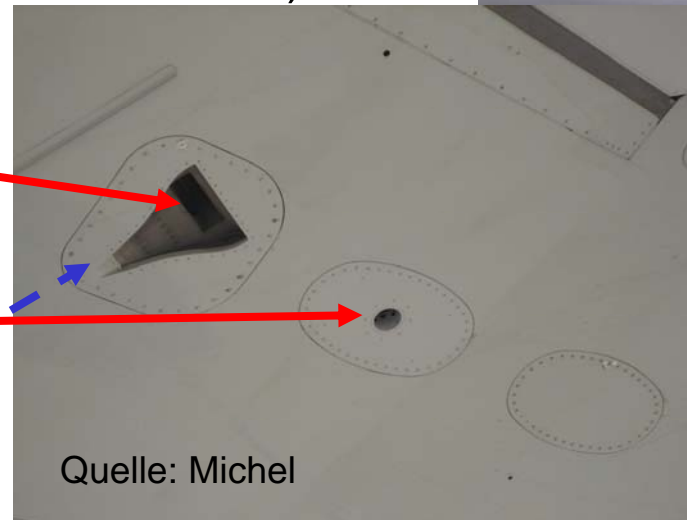
Umströmungslärmquellen am Flugzeug

- Hochauftriebshilfen
 - Vorflügel
 - Klappen
 - Fahrwerke
- Hohlräume jeder Art können Töne erzeugen (wie bei überblasener Flasche)



Geräuschloser
Lufteinlass

Sehr lauter Ton
Druckentlastung Tank



Strömungsrichtung

Öffnungen an der Gondel erzeugen Ton

Welche Neuerungen im Triebwerksbau haben die erreichte Lärminderung bewirkt?

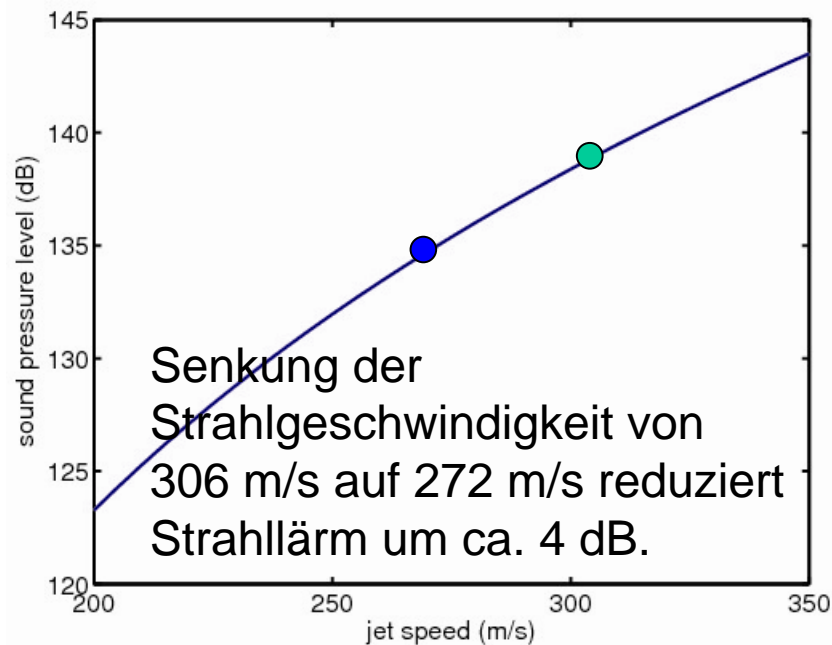
Technische Neuerungen zur Senkung des Triebwerkslärms

Die wichtigsten Neuerungen werden im Folgenden diskutiert. Viele weitere Maßnahmen müssen unerwähnt bleiben.

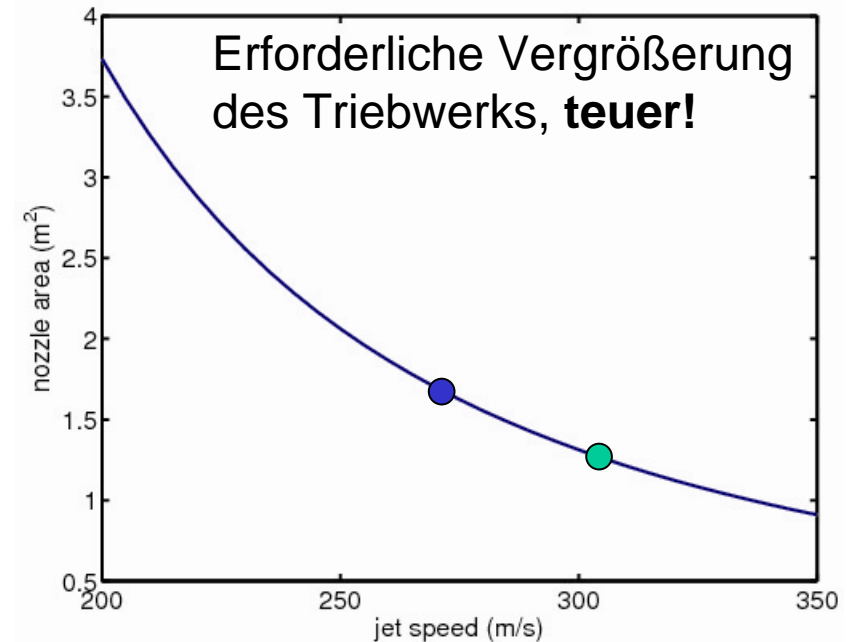
- 1. Einführung des Nebenstromtriebwerks in die Zivilluftfahrt (seit 1960) und schrittweise Erhöhung des Nebenstromverhältnisses auf Werte bis über 10 (2010, Rolls Royce Trent 1000, Boeing 787).**

Innovationen am Triebwerk

- Erhöhung der Nebenstromverhältnisse
- Technisch genauer: Erniedrigung des Fandruckverhältnisses.
 - Kleinere Strahlgeschwindigkeiten (s. unten links)
 - Höhere Massenströme (größerer Fandurchmesser, unten rechts)



Methode: Michalke & Michel



Technische Neuerungen zur Senkung des Triebwerkslärms

- 1. Schrittweise Erhöhung des Nebenstromverhältnisses auf Werte bis über 10.**
- 2. Verlegung des Leittrads des Fans hinter den Rotor**

Erste Nebenstromtriebwerke mit Eintrittsleitrad



Quelle: Wikimedia Commons

Rolls-Royce Conway (Boeing 707, Douglas DC8, Vickers VC10)

Eintrittsleitrad verursacht sehr laute Töne

Nebenstromverhältnis 0.3

Erstes in der Luftfahrt eingesetztes
Nebenstromtriebwerk

Weitere Triebwerke dieser Bauart:

JT3D, (Boeing 707, Douglas DC8,
Lockheed Starlifter C-141B, noch bis 2005
in Frankfurt zu hören)

Spey, sehr weit verbreitet an BAC 1-11

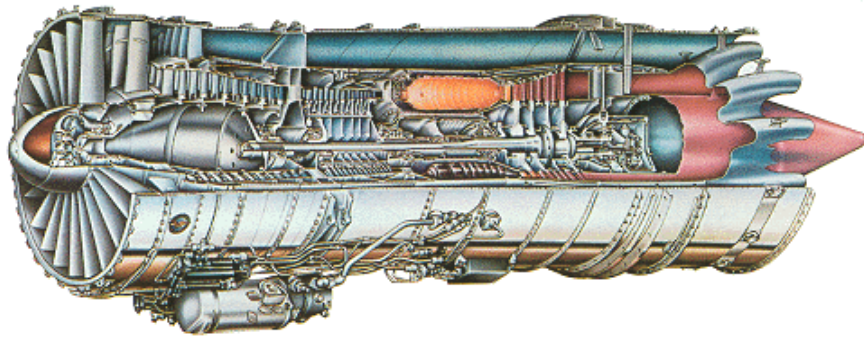
JT8D, Boeing 727, 737-100/200



Technische Neuerungen zur Senkung des Triebwerkslärms

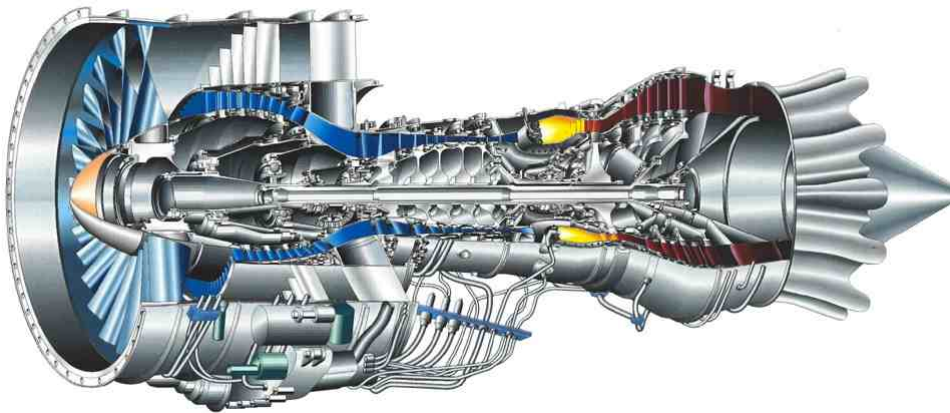
1. **Schrittweise Erhöhung des Nebenstromverhältnisses auf Werte bis über 10.**
2. **Verlegung des Leittrads des Fans hinter den Rotor.**
3. **Zwangsmischer für Nebenstromverhältnisse bis 7**

Zwangsmischer



JT8D

<http://www.b737.org.uk/powerplant.htm>



PW6000

Quelle: www.epower-propulsion.com

- Zwangsmischer erhöht Schub und reduziert Lärm

Frühes Beispiel:

JT8D (B727, B737-100/200)

Heutige Beispiele:

- BR710, BR725 (versch. Business Jets)
- BR715 (Boeing 717)
- CFM56-5C (A340-200/300)
- PW6000 (A318)

Technische Neuerungen zur Senkung des Triebwerkslärms

1. Schrittweise Erhöhung des Nebenstromverhältnisses auf Werte bis über 10.
2. Verlegung des Leittrads des Fans hinter den Rotor.
3. Zwangsmischer für Nebenstromverhältnisse bis 7
4. **Erhöhung der Zahl der Statorschaufeln (Cut-off design)**

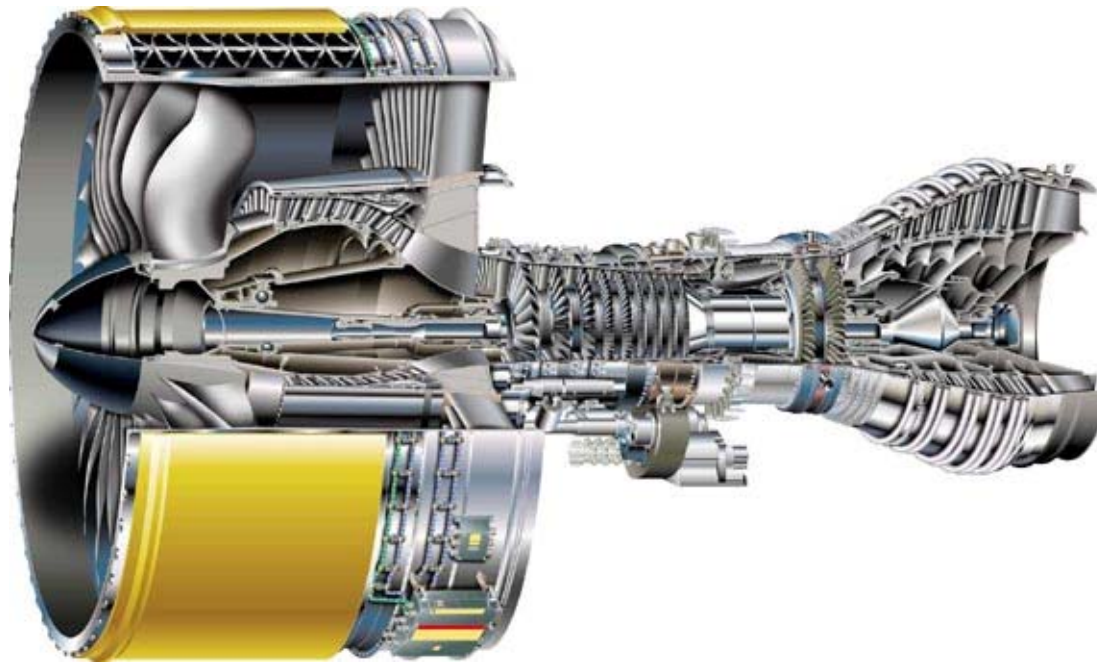
Cut-off Entwurf

- Anwendung einer Theorie von Tyler und Sofrin (1962)
Betrifft Rotor-Stator Wechselwirkungstöne
- Durch sorgfältige Auswahl der Zahl der Statorschaufeln kann erreicht werden, dass der Ton bei der Blattfolgefrequenz nicht ausbreitungsfähig ist und im Triebwerk gefangen bleibt.
Cut-off Entwurf

Technische Neuerungen zur Senkung des Triebwerkslärms

1. Schrittweise Erhöhung des Nebenstromverhältnisses auf Werte bis über 10.
2. Verlegung des Leittrads des Fans hinter den Rotor.
3. Zwangsmischer für Nebenstromverhältnisse bis 7
4. Erhöhung der Zahl der Statorschaufeln
5. **Vergrößerung des Abstandes zwischen Rotor und Stator**

Neueste Triebwerke mit sehr großem Abstand zwischen Rotor und Stator



GP7200
(Triebwerk des A380)

Quelle: www.epower-propulsion.com

Technische Neuerungen zur Senkung des Triebwerkslärms

1. **Schrittweise Erhöhung des Nebenstromverhältnisses auf Werte bis über 10.**
2. **Verlegung des Leittrads des Fans von vorn nach hinten.**
3. **Zwangsmischer für Nebenstromverhältnisse bis 7**
4. **Erhöhung der Zahl der Statorschaufeln**
5. **Vergrößerung des Abstandes zwischen Rotor und Stator**
6. **Reduktion der Blattspitzen-Machzahl des Fans und Pfeilung der Schaufelspitzen**

Reduktion der Umfangsgeschwindigkeit

Reduktion der Blattspitzen-Machzahl M des Fans

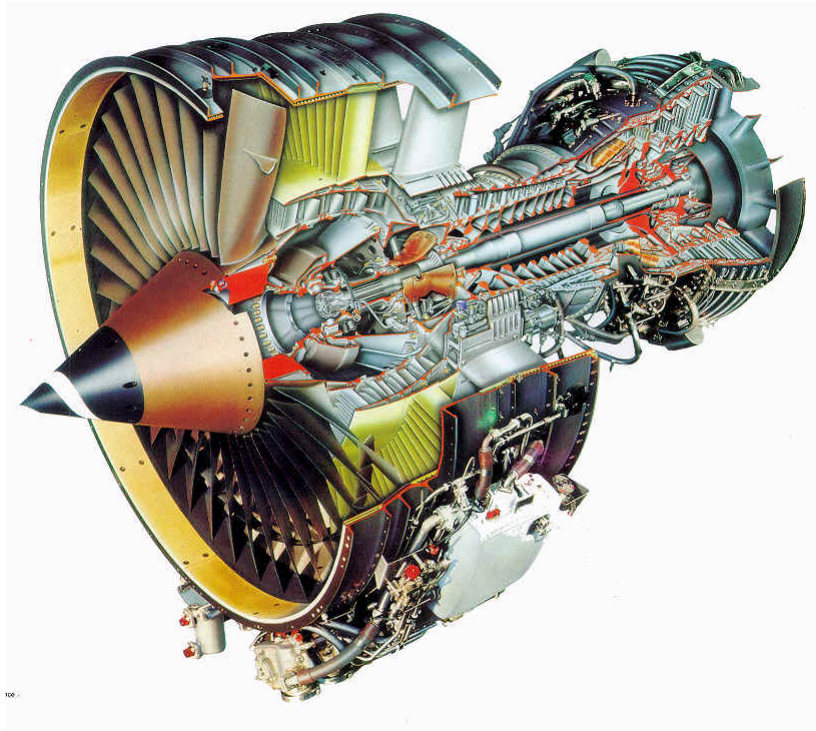
Früher $M=1,45$ Airbus A340-500/600 (Trent 500)

Jetzt $M=1,28$ Airbus A380 (Trent 900, GP7200)

Zukünftig $M=1,15$ Boeing 787 (Trent 1000)

- Kreissägentöne bei A380 offenbar verschwunden
- Je kleiner M , umso größer muss Drall zwischen Rotor und Stator sein.
- Drall reduziert Rotor-Stator-Wechselwirkungstöne

Pfeilung der Blattspitzen



Quelle: www.epower-propulsion.com

CFM56 ohne Pfeilung



Quelle: Wikimedia Commons

Trent 900 mit Pfeilung

Pfeilung reduziert Stärke der Verdichtungsstöße vor dem Rotor

Technische Neuerungen zur Senkung des Triebwerkslärms

1. **Schrittweise Erhöhung des Nebenstromverhältnisses auf Werte bis über 10.**
2. **Verlegung des Leittrads des Fans von vorn nach hinten.**
3. **Zwangsmischer für Nebenstromverhältnisse bis 7**
4. **Erhöhung der Zahl der Statorschaufeln**
5. **Vergrößerung des Abstandes zwischen Rotor und Stator**
6. **Reduktion der Blattspitzen-Machzahl des Fans und Pfeilung der Schaufelspitzen**
7. **Chevrons (gezahnte Düsen)**

Reduktion des Freistrahllärms

- Freistrahle ist Schallquelle außerhalb des Triebwerks, daher nur begrenzt reduzierbar.
 - Gezahnte Düsen (Chevrone) einzig wirksame Methode mit nur geringem Schubverlust
 - Lärminderung aber nur begrenzt.
-
- Nachrüstung bei existierenden Triebwerken möglich.



Quelle: Wikimedia Commons

Chevrone an der Boeing 787
vor allem zur Senkung des
Kabinenlärms im Reiseflug

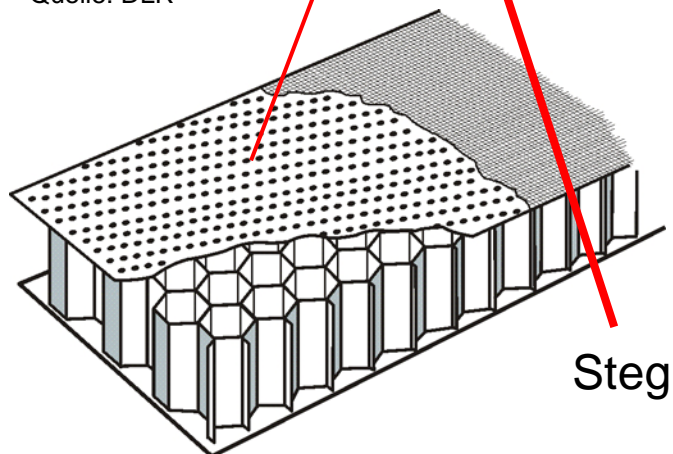
Technische Neuerungen zur Senkung des Triebwerkslärms

1. Schrittweise Erhöhung des Nebenstromverhältnisses auf Werte bis über 10.
2. Verlegung des Leittrads des Fans von vorn nach hinten.
3. Zwangsmischer für Nebenstromverhältnisse bis 7
4. Erhöhung der Zahl der Statorschaufeln
5. Vergrößerung des Abstandes zwischen Rotor und Stator
6. Reduktion der Blattspitzen-Machzahl des Fans und Pfeilung der Schaufelspitzen
7. Chevrons (gezahnte Düsen)
8. **Verbesserung der schalldämpfenden Auskleidung**

Passive schalldämpfende Auskleidung (Liner)



Quelle: DLR



Quelle DLR/TU Berlin

- Schalldämpfende Auskleidung sehr wichtig.
- Reduziert Schallemission triebwerksinterner Schallquellen um bis zu 20 dB.

Fortschritte:

- Ursprünglich übliche Abdeckung mit Lochblech ergänzt durch Drahtgeflecht: schalldämpfende Wirkung weniger abhängig von Strömungsgeschwindigkeit.
- Zwei Lagen Honigwaben in einzelnen Bereichen: Bessere Wirkung über breiteren Frequenzbereich.
- Vermeidung von Fügestegen (Montagestege, Segmentierung)
 - Schalldämpfer im Triebwerkseinlauf in einem Stück gefertigt.
 - Verzicht auf Schalldämpfer unmittelbar am Rotor, wenn sie Stege haben.



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Neuerungen zur Reduktion des Umströmungslärms



Technische Neuerungen zur Senkung des Umströmungslärms

- 1. Konstruktive Maßnahmen zur Vermeidung von Hohlraumtönen**
- 2. Reduktion des Vorflügelärms**

Beseitigung von Hohlraumtönen

Hohlraumtöne sind die lautesten Schallquellen bei der Landung einiger Flugzeuge.

Hohlraumtöne werden heute vor der Zulassung erkannt und beseitigt.

Messtechnik:

Mikrofonarray

DLR: Bis zu 240

Mikrofone auf dem
Boden messen
Überflugeräusche,
Auswertung liefert
Position aller
Schallquellen.



Quelle: DLR

Geräusch der Vorflügel

- Niedrigeres Geräusch der Vorflügel:
Einführung gesenkter Flügelnasen an Stelle eines Teils der Vorflügel
(hat auch bessere Steigfähigkeit nach dem Abheben zur Folge)
- Weitere bekannte Lärminderungsmaßnahmen an
Umströmungslärmquellen noch nicht im Einsatz, beispielsweise
 - Verringerung der Spaltbreite reduziert Vorflügelärm
 - Verkleidung des Fahrwerks reduziert Fahrwerkärm

Was ist in nächster Zeit zu erwarten?



Maßnahmen in naher Zukunft

- Weitere Erhöhung der Nebenstromverhältnisse
- Langsamer Fan (Boeing 787 und Bombardier C-Series)
- Verstellbare Düse (C-Series), Düsenaustrittsquerschnitt bei Start und Landung vergrößert.
 - Minderung des Triebwerkslärms
 - Verbesserung der Steigfähigkeit nach dem Start.
- Verbesserung der Schalldämpfer
 - Optimierung der Dämpfungseigenschaften
 - Vergrößerung der Oberflächen
 - Gleichförmigkeit der Oberflächen
 - Schalldämpfer im Heißgasstrom

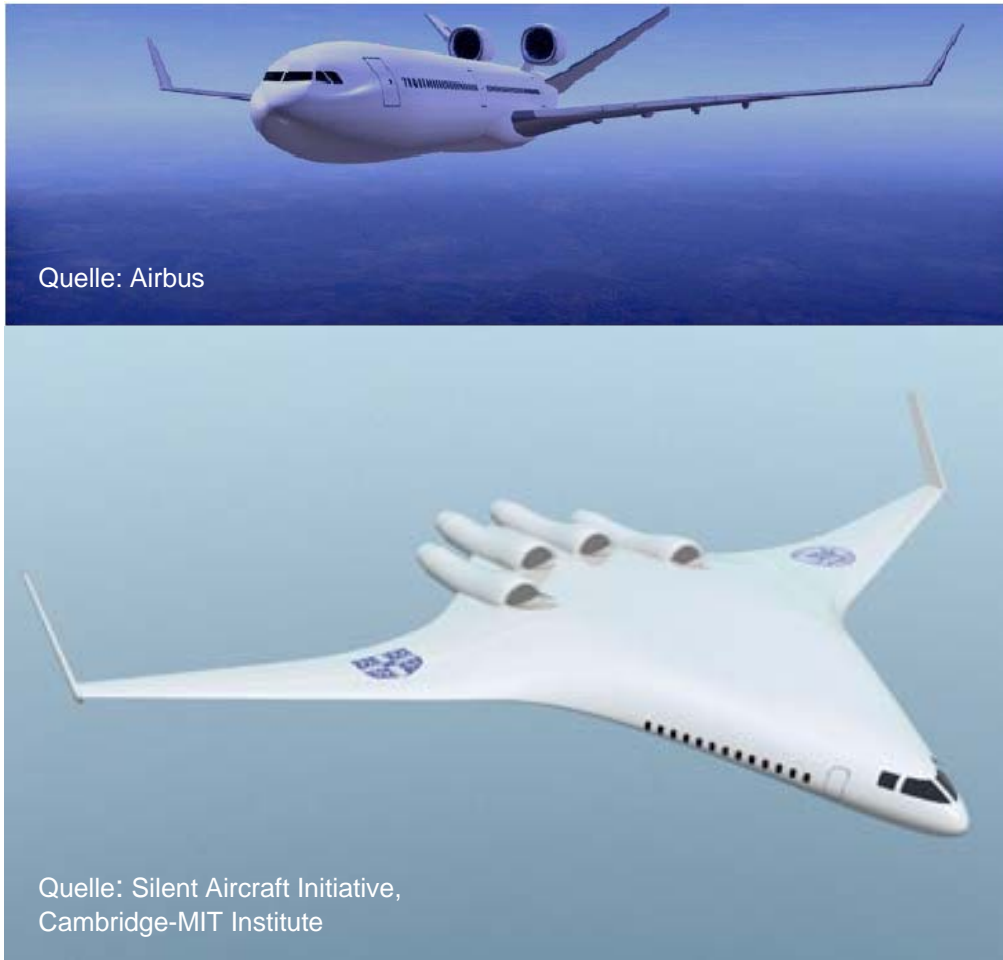
Neue Konzepte Langfristig



EU Ziele zur Reduktion von Emissionen bis 2020: Advisory Council for Aeronautics Research (ACARE)

- -10 dB für jeden der drei Zertifizierungspunkte
- Sehr anspruchsvolles Ziel
- Bereitstellung der Technologie im Rahmen europäischer Forschungsprojekte
- Neue Triebwerkskonzepte erforderlich
 - Weiterentwicklung Getriebefan
 - Gegenläufiger Fan

Neue Flugzeugkonzepte



- Lärminderung durch Abschattung der Schallabstrahlung von den Triebwerkseinläufen
- Strahlärm lässt sich dadurch nicht vermindern



Neue Triebwerkskonzepte

Offene gegenläufige Rotoren



Quelle: ISVR

- Eine erhebliche Senkung des Treibstoffverbrauchs ist nur durch Einführung offener Rotoren möglich. Hohe Flugmachzahlen erfordern gegenläufige Propeller.
- Lärminderung hier sehr viel schwieriger als beim Turbofan. Großer Forschungsbedarf.



Quelle: Snecma gallery



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt e.V.
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Fazit

- Die Triebwerke sind bereits sehr leise geworden.
- Töne in den Umströmungsgeräuschen können stets beseitigt werden.
- Die heutigen Lärmgrenzen sind mit bekannter Technologie einzuhalten.
- Ein großer Teil der Lärminderung an der Quelle in den vergangenen Jahren wurde wettgemacht durch die Zunahme des Flugverkehrs.
- Technische Lösungsansätze und Ideen sind vorhanden, um auch in Zukunft weitere Minderungspotentiale bereitzustellen.
- Leisere Flugzeuge unter den gegebenen Randbedingungen erfordern technische Lösungen, die die Betriebskosten nicht erhöhen.
- Politische Unterstützung in Form von kontinuierlicher und nachhaltiger Forschungsförderung ist weiterhin sehr notwendig
- **Neue Triebwerkskonzepte** mit großem Treibstoffeinsparpotential werden in Zukunft zu neuen großen Herausforderung für die Lärmforschung führen